

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

大跨徑屋頂結構空氣動力特性之先期研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型

計畫編號：NSC 94-2211-E-032-012-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：淡江大學土木工程學系

計畫主持人：鄭啟明

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理：王嘉國、林俊煒

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 95 年 12 月 08 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 ☒ 成果報告
☐ 期中進度報告

大跨徑屋頂結構空氣動力特性之先期研究

計畫類別：☒ 個別型計畫 ☐ 整合型計畫

計畫編號：NSC 94－2211－E－032－012

執行期間： 94 年 8 月 1 日至 95 年 7 月 31 日

計畫主持人：鄭啟明

共同主持人：

計畫參與人員：王嘉國 林俊煒

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：☒ 精簡報告 ☐ 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- ☐ 赴國外出差或研習心得報告一份
- ☐ 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- ☐ 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- ☐ 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

☐ 涉及專利或其他智慧財產權，☐ 一年☐ 二年後可公開查
詢

執行單位：淡江大學土木系

中 華 民 國 95 年 11 月 15 日

大跨徑屋頂結構空氣動力特性之先期研究

A Preliminary Study on the Aerodynamic Characteristics of Long Span Roof Structures

計畫編號：NSC 94-2211-E-032-012

執行期限：94 年 8 月 1 日至 95 年 7 月 31 日

主持人：鄭啟明 淡江大學土木系

計畫參與人員：王嘉國 林俊煒

一、中文摘要

本文探討曲面屋頂之設計風載重，使用 LRC (Load - Response -Correlation)法計算其屋頂設計風載重並與等值靜態設計風載重方法做比較。由本文分析結果得知，整個曲面屋頂受風時皆承受上揚力的作用，且在上風處的風力平均值與 RMS 值皆會比下風處要大。而 LRC 設計載重值與陣風反應因子法之設計風力相當接近，但在平均風力小，而擾動風力大之區域下三者有較明顯差異。

關鍵詞：曲面屋頂、LRC、設計風載重

Abstract

Domes with large span and grand standing arched roofs tend to be light weighted and relatively flexible, therefore, more wind sensitive than the other large structural systems. The simplified design wind load in the current building wind code is suitable only for small to medium size storage dome. A more sophisticated design wind load procedure is needed for large span dome or arched roof system. In order to investigate the designed wind loads of arched roofs, this project used a real arched roof system in Kaoshiung as the target structure. The Load- Response -Correlation Procedure (LRC) and traditional procedure was used to evaluate the proper design wind load.

Keywords: Arched roof, LRC , Design wind load

二、前言

從事曲面屋頂建築設計時，因為其通常是為車站、廠房或體育館等建築，其高度跨徑比值較小，因此相較於地震力，風力更是一種重要的載重形式。目前國內外的規範當中，有提供曲面屋頂風力載重的相當少，而有提供的多是用經驗公式作計算，難以完全描述風力的隨機與複雜特性；況且結構物鄰近的地形、地物及風向等等皆是影響結構物所受到風力大小的重要因素，規範無法涵蓋周全，所以曲面屋頂建築必須進行風洞實驗，將真實的情況盡可能的模擬出來，以彌補規範未及之處。

關於設計風載重方面；在 1991 年以前，並沒有很適合的方法於計算非線性系統的影響，而德國學者 M. Ksaperski[1]於 1991 年提出一名為 (LRC)load-response -correlation 的重要方法，對於線性系統此方法可計算出造成最大結構反應的風載重分佈。對於非線性系統其也可以得到相當不錯的近似值。而雖然臨界載重分佈是基於載重過程為高斯分佈的假設，但 (LRC) 對於載重過程為非高斯分佈也能提供相當接近真實的載重形式近似值。所以此方法在對於研究曲面屋頂受風影響的研究上相當重要。

三、實驗設置與數值分析

(一) 實驗設置

本文主要是以高雄捷運 R17 車站作為標的，實驗模型縮尺為 1:200。高雄 R17 車站真實屋頂部份為鋼架、圓柱及鋼纜所組成；下部天橋、月台及軌道等為鋼筋混

泥土及鋼結構所構成，在本研究中只取其特殊造型的屋頂部份分析，而屋頂圓柱連接月台層的束制條件是假設為固定。其屋頂部份長 153.8m，寬 36.72m，曲率半徑為 50.3m，屋頂最高點為 25.53m，最低點為 22.138m，cable 共有 16 組。

實驗中的長度縮尺為 1:200；速度縮尺為 1:3.7；時間縮尺為 1:54。試驗時以車站為中心，每轉動 10 度量取一次風壓值，以模擬不同方向之來風。本文採用多頻道電子式風壓掃描器，用來同步擷取作用於結構表面各點的瞬時風壓，本實驗模型為一 1:200 縮尺壓克力風壓模型，在車站取面屋頂上下各有 184 個壓力量測點，由上下壓力差可算出風壓值，模型如圖 1 所示。



圖 1. R17 車站 1:200 壓克力風壓模型

(二) 設計載重計算流程

(1) 傳統設計載重法

傳統設計載重之計算方式一般採用陣風反應因子法或極值設計風載重，陣風反應因子法是將各載重點平均風力乘上陣風反應因子 (gust response factor)，作為設計載重。而極值設計風載重是將載重點平均風力再加上載重點擾動風力均方根值乘上尖峰因子 (peak factor)，作為設計載重。本研究另將擾動風力均方根值分離為背景反應， B_i ，與共振反應， R_i ，兩部分，以進一步考慮結構動態效應。

(2) LRC 法

LRC 法計算流程如下: (i)選擇對於設計重要的反應 r_i ; (ii)選擇載重 p_k 個數; (iii)由實驗風力歷時資料計算載重平均值向量 \bar{p}_k ，載重標準差向量 σ_p ，載重 covariance 矩陣 σ_p^2 ; (iv) 由 SA2000 程式所建立之數值模型求計算影響因子 (influence factors) a_{ik} ; (v)計算彎矩平均值向量 \bar{r}_k :

$$\{\bar{r}\}_{444 \times 1} = [a]_{444 \times 80} \cdot \{\bar{p}\}_{80 \times 1} ; \text{(vi) 計算彎矩}$$

$$\text{標準差向量 } \sigma_r : \sigma_{r_i} = \left[\sum_{k=1}^{80} a_{ik} \cdot \sum_{l=1}^{80} a_{il} \sigma_{p_{kl}}^2 \right]^{1/2} ;$$

(vii)計算載重 p_k 與強軸彎矩 r_i 的相關性

$$\rho_{p_k r_i} : \rho_{p_k r_i} = \left[\sum_{l=1}^{80} a_{il} \cdot \sigma_{p_{kl}}^2 \right] \cdot [\sigma_{p_k} \cdot \sigma_{r_i}]^{-1} ; \text{(viii) 選}$$

擇尖峰因子 (peak factor) ; (viii)計算每一桿件發生最大強軸彎矩的極值載重分佈

$$p_{e_k} : p_{e_k} (\max r_i) = \bar{p}_k + g \cdot \sigma_{p_k} \cdot \rho_{p_k r_i}$$

由上式可以求得每一桿件發生最大強軸彎矩時的載重分佈情形，但由於桿件一共有 444 個，因此一共會得到 444 組極值載重分佈，考量桿件對整體載重之重要性，本文以曲面屋頂有連接圓柱的的桿件發生最大強軸彎矩時的載重分佈情形，來作為設計載重依據。

四、實驗結果與討論

(一) 曲面屋頂歷時風力資料平均值與 RMS 值分佈

由實驗所得風力歷時資料之平均值中可以發現，整個曲面屋頂皆承受到上揚力的作用。本研究取整體受力最大之風攻角進行分析研究，而該風攻角約為 100 度 (北方為 0 度，順時針計算)。在圖 2、3 中可以發現，整體風力的平均值及 RMS 值的縱向分佈大致呈現對稱性分佈，而在上風處的風力平均值與 RMS 值皆比下風處大。

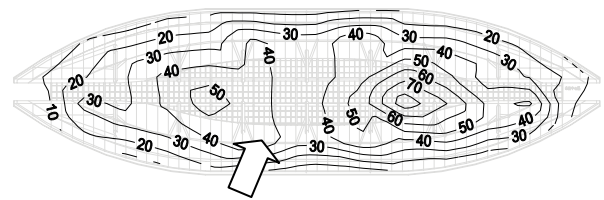


圖 2 平均風壓分佈 (箭頭代表風向)

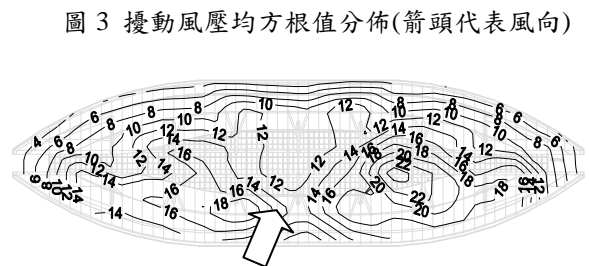


圖 3 擾動風壓均方根值分佈 (箭頭代表風向)

(二) 曲面屋頂設計風載重設計風載重比較

由 LRC 法一共選取了 444 個桿件的強軸彎矩為反應元素，所以將會產生 444 組設計風載重分佈，本節將利用由 LRC 法所求出之三組設計風載重分佈類型，第一種為取有連接到圓柱的屋頂桿件作為風力載重設計依據。本曲面屋頂共有七支圓柱支撐，而曲面屋頂是由四支桿件與每一圓柱連接，但我們發現以同一圓柱與曲面屋頂連接的四個桿件為反應所得到之設計風載重分佈值相當接近，所以本文皆取其中一支桿件為代表桿件，並以七組設計載重中之最大值作為設計載重參考值(簡稱 LRC-simplified)。第二種為全部 444 組設計風載重之最大值(簡稱 LRC-max)。另外再列出陣風反應因子法、極值設計風載重所求得之共四種設計風載重，進行不同設計風載重之間的比較與探討。為方便瞭解不同設計載重之差異性，將載重點分成六區如圖 4 所示。

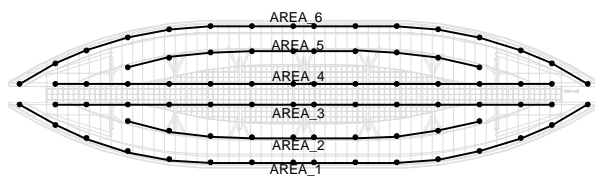


圖 4 載重點分區

而圖 5 為四種不同設計風載重在六個載重區之比較圖，在靠近迎風面 AREA_1 處，極值設計風載重在此區高於其他設計風載重，其次是 LRC 法全部 444 組設計風載重之最大值(簡稱 LRC-max)，而另外兩種設計風載重之設計風力在此區域較為相近。在 AREA_2 處，其設計風載重大小分佈與 AREA_1 相近。在 AREA_3，四組設計載重皆相當接近。在 AREA_4、AREA_5、AREA_6 中，極值設計風載重低於其他設計風載重，而其他三組種設計風載重之設計風力在此區域較為相近。

由圖 6 可看出在此六區原始風壓數據中主要差異在於風力平均值及擾動均方根值，在平均風力小，但風力擾動大之區域，如 AREA_1 及 AREA_2，LRC-max 設計載重明顯較大。而 LRC-simplified 與陣風反應因子法之設計風力，在各區皆相當接近。故可判斷，以七組連接圓柱桿件之強

軸彎矩為依據所決定之設計載重 LRC-simplified 接近陣風反應因子法之設計風力。但此法可能因取不同位置之桿件反應作為依據而有所不同，且在平均風力小，但風力擾動大之區域，其差異應會更大。

上述三種方法，皆不考慮結構動態效應的影響。而在本文所提出之極值設計載重部分，因本結構第一振態為 X 向振動，然而屋頂之幾何外型致使 X 向風力相對其他方向而言相當小，其動態反應不明顯。而第二、第三振態之 Rx (扭轉) 振動為主要振態。故其動態載重加入了以扭轉振態為主之共振部分，且因其扭力方向動態風載之共振部分大於背景部分，故其設計載重在局部區域明顯較高。且考慮其扭轉效應時，尖峰因子在屋頂兩側，採用一正一負計算，使得設計風載重與其他各組載重差異較大。但本文提出之極值設計載重，在此類結構，較能反映出整體扭力之效應。不過，對於垂直或水平之載重，極值設計載重在偏下游處之設計載重，包括 AREA_4、AREA_5、AREA_6，其設計載重有偏小趨勢。而整體載重，以垂直載重而言，最大值為極值設計載重約為 508T，其次為 LRC-max 設計載重約為 494T，再其次為 LRC-simplified 設計載重約為 396T，最小為陣風反應因子設計載重約為 380T。

對於上述設計風載重，是以單一風向角所計算求得，所以在實際設計或檢覈結構時，應以屋頂中央 X 軸為對稱軸，以對稱方式分兩次施加载重，以完整考慮其可能之風力載重形式。

五、結論

1. 整個曲面屋頂受風時皆承受上揚力的作用。而在上風處的風力平均值與 RMS 值皆會比下風處要大，這與文獻及過往的觀念中是一致的。
2. 以不同圓柱連接桿件為反應的設計風載重分佈趨勢與實驗風力歷時資料平均值分佈趨勢相似，幾乎都是風力歷時平均值分佈趨勢的變形，但是其設計風力載重值比風力歷時平均值要大上許多，因此可推測風力歷時 RMS 值部份對於設計風載重會有相當程度的貢獻。
3. 比較幾種設計風載重分佈發現；LRC 設

計載重值與陣風反應因子法之設計風力較為接近，但在擾動風力極小狀況下兩者會有明顯差異。而取全部 444 組設計風載重平均值的設計風載重偏小，設計上會有安全性上的疑慮。而取全部 444 組設計風載重最大值的設計風載重在擾動值大的區域，設計上會較為保守。

4. 在本文所提出之極值設計載重部分，其動態載重加入了以扭轉振態為主之共振部分，且因其扭力方向動態風載之共振部分大於背景部分，故其設計載重在局部區域明顯較高。而整體載重，以垂直載重而言，最大值為極值設計載重，其次為 LRC-max 設計載重，再其次為 LRC - simplified，最小為陣風反應因子設計載重。
5. 考慮扭轉效應時，若有採用尖峰因子，

在屋頂兩側應採用一正一負計算，在此類結構，較能反映出整體扭力之效應。但應以屋頂中央 X 軸為對稱軸，以對稱方式分兩次施加载重，以完整考慮其可能之風力載重形式。

六、參考文獻

1. M. Ksaperski Extreme wind load distributions for linear and nonlinear design, Eng. Struct. 1992, Vol. 14, pp27~34.
2. Cermak, J. E., Peterka, J. A., 1974, "Simulation of Atmospheric Flows in Short Wind Tunnel Test Sections", Center for Building Technology, IAT, National Bureau of Standards Washington, D.C., June.
3. B. Bienkiewicz, Y. Tamura, H.J. Ham, H. Ueda, K. Hibi, 1995, "Proper orthogonal decomposition and reconstruction of multi-channel roof pressure" J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 54/55, p369-381.

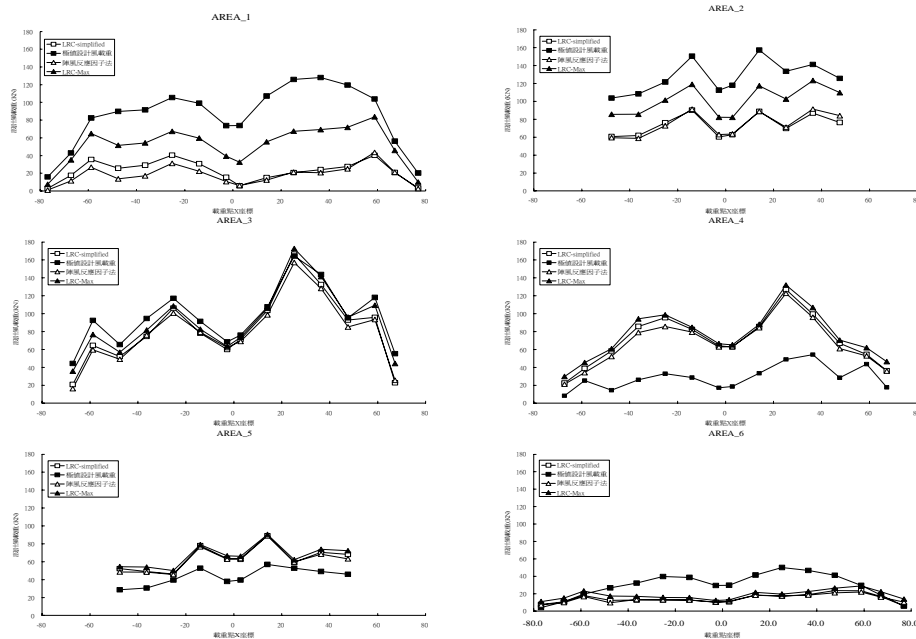


圖 5. 設計載重比較圖

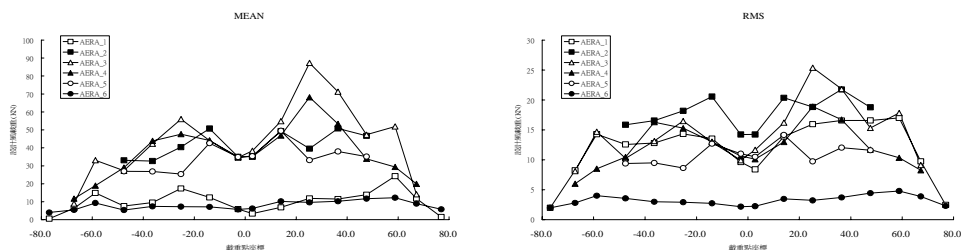


圖 6. 六區載重點之歷時風力平均值及擾動均方根值

研究成果自評：

大跨徑屋頂結構所受的風力特性與其耐風設計與高層建築有很大的差異，耐風設計的方法在國際間亦無定論。本計畫是國內針對此類結構空氣動力特性與耐風設計的第一個研究。本研究對於大跨徑屋頂結構的空氣動力特性、風洞模擬實驗、結構動力分析以及設計風力的複雜性，都有了初步的研究，研究成果也發表於中華民國第一屆風工程研討會。未來會本著本計畫的研究成果，針對大跨徑屋頂結構的風力特性與其耐風設計提出更嚴謹的多年期研究計畫。以一個先期研究計畫而言，本案已完成所訂定的目標。